第41卷 第11期
2024年11月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 41 No. 11
Nov. 2024

基于改进S-W模型的南小河沟流域蒸散发分配及控制机制

杨 楠[1]，宋孝玉[2]，邓建伟[1]，李蓝君[2]，赵新凯[2]，孟鹏飞[2]，
符 冲[2]，魏婉茵[2]，张育斌[1]，丁 林[1]，李浩霖[3]

（1. 甘肃省水利科学研究院，甘肃 兰州 73000；2. 西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室，陕西 西安 710048；3. 北京工业大学，北京 100124）

摘 要：精准量化蒸散发（ET）及组分并探明其控制因子，有利于合理评价及规划管理区域水资源。根据黄土高原水土保持治理典型小流域南小河沟流域2016—2020年连续性长期观测数据及野外试验，基于改进的S-W（Shuttleworth-Wallace）模型，模拟典型人工林地ET及组分动态变化，并利用结构方程模型（Structural Equation Modeling，SEM）分析植物蒸腾（T）、土壤蒸发（E）与控制因子间的耦合关系。结果表明：(1) 改进的S-W模型在南小河沟流域适用性较好，其中土壤表面抗阻力（r_s^s）的阈值为50~2500 s·m^{-1}，与土壤表层含水量（θ）经验函数类型为指数型，土壤颗粒中沙粒含量越大，线型斜率越大。(2) 典型人工林地ET范围为276.76~402.86 mm，多年平均T、E占ET的51.6%和48.4%，ET、T和E规律为各月间变化不明显，但日间波动剧烈，T和E波动趋势基本一致，与年降雨量变化一致，和次降雨表现滞后性。(3) SEM分析净辐射（R_n）、气温（T_a）、θ对ET影响最为显著，其中R_n对T影响最大（总影响为0.614），T_a对E影响最大（总影响为0.426）；T对E体现为正相关，贡献系数达0.503。基于改进的S-W模型对ET进行评价及组分分离，为深刻揭示干旱半干旱区生态水文过程提供依据。

关键词：蒸散发组分；改进S-W模型；SEM模型；蒸发抗阻力；南小河沟流域

蒸散发（ET）是水文循环中不可或缺的一环[1]，是生态系统中水分及能量平衡的重要组成部分，尤其在黄土高原地区，蒸散发占系统水量损失的80%以上[2]。ET同时作为植物需水及水资源评价的关键，是干旱监测的重要指标，它的两个组成部分植物蒸腾（T）和土壤蒸发（E）有不同的生物和物理过程以及主导因素[3]。因此，精确模拟ET及组分并研究蒸散发分配的控制机制，从组成部分揭示蒸散发过程，对黄土沟壑区水资源的高效规划、管理和应用等均具有重大意义。

目前ET评估方法主要包括稳定同位素、液流和涡动相关技术等方法[4]，其不受假设条件约束，具有直接测量的优势。但因经济成本较高、观测频率低、仪器难以维护、适用范围窄等因素在实际应用中受到不同程度的限制[5]。所以数学模型法是目前评估ET的主要方法，其中Penman-Monteith模型（P-M模型）[6-7]和Shuttleworth-Wallace模型（S-W模型）[8-9]因结构简单、适应性强、经济方便得到广泛应用，尤其在地形地貌条件复杂区域。但由于P-M模型不能进行蒸散发组分分离，而S-W模型因能捕获物理过程，具有参数相对较少且物理含义清晰、模拟精度较高的优点[10]，成了更好的选择。改进的S-W模型可解决计算不同土壤质地土壤表面抗阻力[11-12]问题，且已被证明在干旱半干旱地区有很好的ET分离应用[13]。

针对ET分配控制机制及其因子间的相互关系，国内外学者多通过比较两两相关的决定系数，或利用多元回归等传统统计方法进行分析[12,14-15]，这些方

收稿日期：2024-05-12； **修订日期**：2024-06-26
基金项目：甘肃省重点研发计划项目（22YF7FA081）；陕西省自然科学基础研究计划项目（2023-JC-ZD-30，2019JZ-45）；甘肃省水利科研与技术推广计划项目（24GSLK007，23GSLK012，23GSLK013）
作者简介：杨楠（1997-），男，硕士研究生，主要从事水土保持、生态水文学研究. E-mail: 15379010323@163.com
通讯作者：宋孝玉. E-mail: songxy@xaut.edu.cn

法仅分析了一个或多个自变量与一个因变量之间的关系,不能进行多个自变量对多个因变量的分析,并且往往忽略了自变量和因变量之间的自相关,导致部分结果不一致甚至相反[16-17]。近年来,结构方程模型(Structural Equation Modeling,SEM)成为有效解决上述问题的方法,它不仅能充分考虑自变量之间的相关关系,还能区分自变量对因变量的影响,被广泛应用于经济学和生态学中[18],但目前在蒸散发控制因子分析中研究较少。

南小河沟流域作为黄土沟壑区典型原型观测小流域,本文基于流域内典型人工林地长期的连续性观测数据及野外试验,通过改进S-W模型对*ET*及组分进行量化和动态评价,利用SEM模型分析其控制机制,使*ET*及组分与控制因子间的响应过程更加清晰,为合理的估算黄土高原沟壑区植物需水量,提高水分利用潜力,以及开展干旱监测和评估相关研究提供参考依据。

1 数据与方法

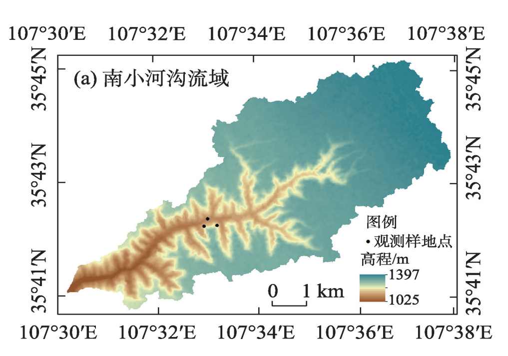
1.1 研究区概况

研究区位于甘肃省庆阳市西峰区境内的南小河沟流域(35°40′43″~35°44′58″N,107°30′8″~107°37′52″E),流域面积为38.7 km^2,是黄委会西峰水土保持试验站于1951年建立的黄土沟壑区典型原型观测小流域(图1)。具有典型的黄土高原沟壑区地貌特征,主要包括塬面、梁峁坡、沟谷三大类,流域地质构造单一,土壤类型为砂壤土,抗蚀性差,易发生水土流失。近年来,随着黄土高原地区大规模水土保持工作的开展,流域内植被覆盖度明显增加,植被类型主要以刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、山杏(*Armeniaca sibirica*)以及紫花苜蓿(*Medicago sativa*)等为主。

1.2 数据来源与处理

样地分别选用3个树龄基本一致、长势较为良好的刺槐、侧柏、油松人工乔木混交林样地。在样地内进行野外试验布设及观测,观测时间为2016年、2017年、2018年、2019年和2020年的5—10月,观测内容主要包含气象要素、土壤含水量、土壤蒸发、植被叶面积指数等。其植物参数以3种树种平均值代替,树种具体情况见表1。

1.2.1 气象数据 气象数据由3台小型野外气象站(Watch dog series 2000, China)进行测定。仪器设备采用太阳能供电,观测指标包括风速、风向、气温、湿度、全辐射、降雨量等要素。气象站点的安装在3个样地附近空旷处,气象站的观测时间间隔设置为1 h,观测结果转化为日尺度数据,以方便进行后续的分析与计算。为避免出现数据的缺失和失真,平均每间隔一周对气象站进行检查和维护,极少部分的缺失数据由相距最近的气象站数据代替。



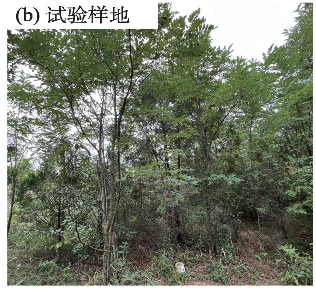




图1 研究区示意及样地和部分试验图

Fig. 1 Schematic diagram of study area and plot and partial test map

表1 试验样地基本情况

Tab. 1 Basic information of the test site

树种	树高/cm	胸径/cm	冠幅/cm	土质	地形	坡位	坡度/(°)
刺槐	564.11±29.60	15.91±2.42	293.11±15.20	砂壤土	阶地	中	26
侧柏	499.43±27.91	17.44±3.73	211.42±11.63	砂壤土	阶地	中	22
油松	446.21±24.23	15.41±1.90	191.60±12.31	砂壤土	阶地	中	21

1.2.2　土壤含水量　采用TDR（Trime TDR，Germany）测管进行测定土壤含水量。在3个样地上开展试验，每个样地2个测点，共设置6个TDR测管，测管埋设位置为0.7倍冠层平均半径处。布设测管时，尽量减少对人工林原状土壤的扰动。TDR测管观测的土壤水分测量深度为0~2 m，0~1 m测量间隔深度为10 cm，1~2 m范围内间隔为20 cm。观测间隔时间为1~3 d，计算取平均值。为减小误差，每次观测保持在当天8:00—11:00完成，每个测管内的每个测量深度观测3次，土层土壤含水量取3次观测的均值。每次降雨后，对土壤含水量进行加测。

1.2.3　土壤蒸发　土壤蒸发使用微型蒸渗仪（Microlysimeters）进行观测。在3个样地上进行，每个样地3个测点，共设置了9个长度为25 cm直径为16 cm的PVC管。在安装时，首先用土夯锤将PVC管垂直砸入土中，然后小心取出原装土，用纱布封底后放回原处，设置时确保微型蒸渗仪内的土壤表面与管口保持一致。PVC管内土壤上的植被需进行拔出处理。顶部装有铁丝提手，以方便后续观测，每次观测在当天下午18:00进行，观测时间间隔为1~3 d。实际蒸散发由称重法进行计算，称重所使用精度为0.01 g的电子天平，两次称量的差值即可视为一定时间内土壤的蒸发量。为了保证微型蒸渗仪的测量精度，每隔20 d应换土一次，换土时（PVC管和管内土壤）的质量保持与上次观测质量一致。

1.2.4　叶面积指数　叶面积指数（LAI）使用植物冠层观测系统（Winscanopy 2006，Canada）进行观测。在3个样地上进行，每块样地2个固定观测点，支架调平后使用“鱼眼”相机拍摄具有代表性的3~5棵乔木，照片在Winscanopy软件中处理得到叶面积指数，观测间隔为4~7 d，计算取平均值。

1.3　研究方法

1.3.1　S-W模型　Shuttleworth-Wallace模型（S-W模型）假设植物冠层为均匀覆盖，引入冠层阻力和土壤阻力参数，认为蒸散发来自土壤蒸发和植物蒸腾这两个“源”，总的水汽源可用潜热通量 λE 表示，其计算公式为[10]：

$$\lambda ET=\lambda E+\lambda T=C_sPM_s+C_cPM_c \tag{1}$$

其中，

$$E=PM_s=\frac{\Delta R+\dfrac{\rho C_pD-\Delta r_a^c\left(R-R_s\right)}{r_a^a+r_a^s}}{\Delta+\gamma\left(1+\dfrac{r_s^s}{r_a^a+r_a^s}\right)} \tag{2}$$

$$T=PM_c=\frac{\Delta R+\dfrac{\rho C_pD-\Delta r_a^cR_s}{r_a^a+r_a^c}}{\Delta+\gamma\left(1+\dfrac{r_s^c}{r_a^a+r_a^c}\right)} \tag{3}$$

式中：ET 为模拟蒸散发量（mm·d^{-1}）；λ 为水的汽化潜热（MJ·kg^{-1}）；PM_s 为模拟土壤蒸发量（mm·d^{-1}）；PM_c 为模拟植物蒸腾量（mm·d^{-1}）；C_s、C_c 为土壤蒸发、植物蒸腾比例系数；r_s^s 为土壤表面抗阻力（s·m^{-1}）；r_a^s 为潜热从土壤表面到冠层高度的空气动力抗阻力（s·m^{-1}）；r_s^c 为植被冠层气孔抗阻力（s·m^{-1}）；r_a^c 为叶片表面到冠层平均高度的空气动力抗阻力（s·m^{-1}）；r_a^a 为潜热从冠层高度到参考高度的空气动力学阻抗（s·m^{-1}）；Δ 为饱和水汽压随温度变化的斜率（kPa·℃$^{-1}$）；ρ 为空气密度（1.29 kg·m^{-3}）；C_p 为空气定压比热[1.03×10^{-3} J·(kg·℃)$^{-1}$]；D 为空气饱和水汽压差（kPa）；γ 为干湿表常数（0.67 hPa·k^{-1}）。

R 为冠层吸收的辐射（W·m^{-2}）；R_s 为土壤吸收的辐射（W·m^{-2}）；计算公式为：

$$R=R_n-G \tag{4}$$

$$R_s=R_{ns}-G \tag{5}$$

$$R_{ns}=R_n\exp\left(-C\mathrm{LAI}\right) \tag{6}$$

式中：C 为消光系数，取值为0.60；G 为土壤热通量（W·m^{-2}）；R_n 为净辐射（W·m^{-2}）；R_{ns} 为土壤吸收的净辐射（W·m^{-2}），由LAI消光原理[19]求得。

1.3.2　结构方程模型（SEM）　结构方程模型（Structural Equation Modeling，SEM）是基于协方差矩阵同时分析多个变量之间因果关系的方法，其整合了因素分析、路径分析，可建立、估计和检验模型的因果关系，同时可以分析自变量对因变量的总影响、直接影响和间接影响[20]，适用于研究多个变量对多个变量之间的相互关系。SEM通常以最大似然估计进行参数估计，而最大似然估计的拟合函数符合 χ^2 分布，因此，在SEM中常以 χ^2 检验来评价模型表现。利用软件Amos 24运行SEM，根据检验结果对模型进行调整与修正，分析植物蒸腾（T）和土壤蒸发（E）的控制机制。

1.4　模型改进参数计算

S-W模型包含了大量的参数，除环境参数外，其公式核心是 r_s^s、r_a^s、r_s^c、r_a^c、r_a^a 五个阻力参数的计算和验证。根据其他学者的研究成果，并结合研究区实际情况，目前 r_a^a、r_a^c、r_a^s 三个参数研究方法较为统一，本研究沿用原模型方法，依然参考文献[10]的公式

计算。另外 r_s^c、r_s^s 两个参数采用其他学者推荐的方法,计算方法如下。

1.4.1 植被冠层气孔抗阻力(r_s^c) r_s^c 根据Jarvis法[21],表示为太阳辐射、水汽亏缺、气温和土壤含水量的函数,即:

$$r_s^c = \frac{r_{s\min}}{\mathrm{LAI}} \frac{F_1}{F_2 F_3 F_4} \tag{7}$$

$$F_1 = \frac{1+f}{f + \frac{r_{s\min}}{r_{s\max}}} \tag{8}$$

$$f = \frac{0.55R_{si}}{R_{sl}} \frac{2}{\mathrm{LAI}} \tag{9}$$

$$F_2 = 1 - 0.0025D \tag{10}$$

$$F_3 = 1 - 0.0016(298 - T_a) \tag{11}$$

$$F_4 = \begin{cases} 1, & \theta_r > \theta_{wp} \\ \dfrac{\theta_r - \theta_{wp}}{\theta_{fc} - \theta_{wp}}, & \theta_{fc} \leqslant \theta_r \leqslant \theta_{wp} \\ 0, & \theta_r < \theta_{fc} \end{cases} \tag{12}$$

式中:$r_{s\min}$ 表示植被冠层最小气孔抗阻力(s·m^{-1}),$r_{s\max}$ 表示植被冠层最大气孔抗阻力(s·m^{-1}),根据崔建国[22]的研究结果分别取170 s·cm^{-1}、1400 s·cm^{-1};F_i(1、2、3、4)表示特定环境变量的应力函数;R_{si} 为植物吸收短波辐射(W·m^{-2});R_{sl} 为光合作用开始时的太阳辐射(W·m^{-2});T_a 为空气温度(K);θ_r 表示植物根系土壤含水量(cm^3·cm^{-3},本文取深度为100~120 cm的土壤含水量代替);θ_{fc} 为田间持水量(cm^3·cm^{-3},通常取0.75θ_{sat});θ_{wp} 为植物凋萎系数(0.05 cm^3·cm^{-3});

1.4.2 土壤表面抗阻力(r_s^s) r_s^s 调节水蒸气从土壤内部移动到土壤表层,与上层土壤水分有很强的依赖性。研究表明 r_s^s 和土壤表层含水量θ间存在函数关系[23],即:

$$r_s^s = a_1 \left(\frac{\theta_{sat}}{\theta} \right)^{b_1} + c_1 \tag{13}$$

式中:θ 表示土壤表层含水量(cm^3·cm^{-3}),由于土壤表面的复杂性,本文取深度为10 cm的土壤水分含水量代替;θ_{sat} 为土壤饱和含水量(0.41 cm^3·cm^{-3});a_1、b_1、c_1 为模型中需要率定的参数。

1.5 模型评价方法

模型评价的目的是判断模型是否满足研究要求。本文使用均方根误差(RMSE)、决定系数(R^2)、纳什效率系数(NS)对模型模拟精度进行评价,计算公式及评判标准详见文献[2]。

2 结果与分析

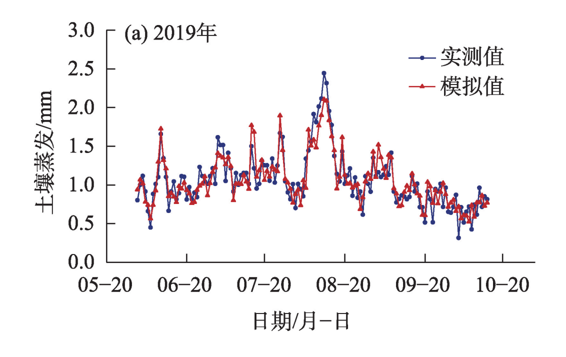
2.1 改进的S-W模型应用

2.1.1 模型检验 使用2016年、2017年和2018年6—10月气象及观测数据进行参数率定,2019年和2020年数据进行模型验证。根据原模型 r_a^a、r_a^c、r_a^s 三个参数和替换的 r_s^c、r_s^s 两个参数的计算,代入公式(2),进行土壤蒸发模拟检验,模拟结果如图2所示。

由图2可以看出,改进的S-W模型土壤蒸发模拟结果较好,其实测值与模拟值相差不大,模拟精度评价指标RMSE、R^2、NS在2019年和2020年分别为0.16 mm·d^{-1}、0.80、0.81和0.13 mm·d^{-1}、0.82、0.84。所有评价指标结果均在合理范围内,说明模型中的参数计算合理,改进的S-W模型适用于模拟南小河沟流域典型人工林地。

2.1.2 蒸散发及其组分动态模拟 对南小河沟流域典型人工林地蒸散发及组分进行日尺度模拟(图3)。

由图3可以看出,在5个试验年度内,典型人工林地蒸散发、植物蒸腾、土壤蒸发变化表现为各月变化不明显,但日间波动剧烈,植物蒸腾和土壤蒸发波动趋势基本一致。模拟蒸散发量变化范围为



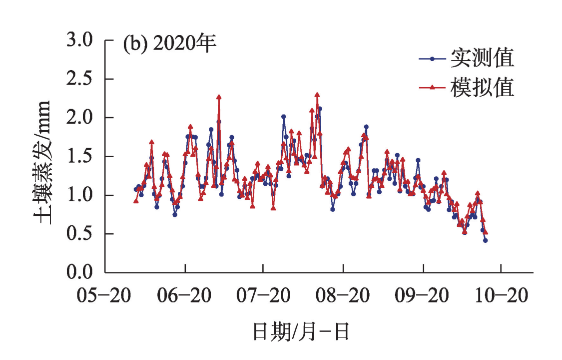


图2 模拟值与实测值对比

Fig. 2 Comparison between simulated and measured

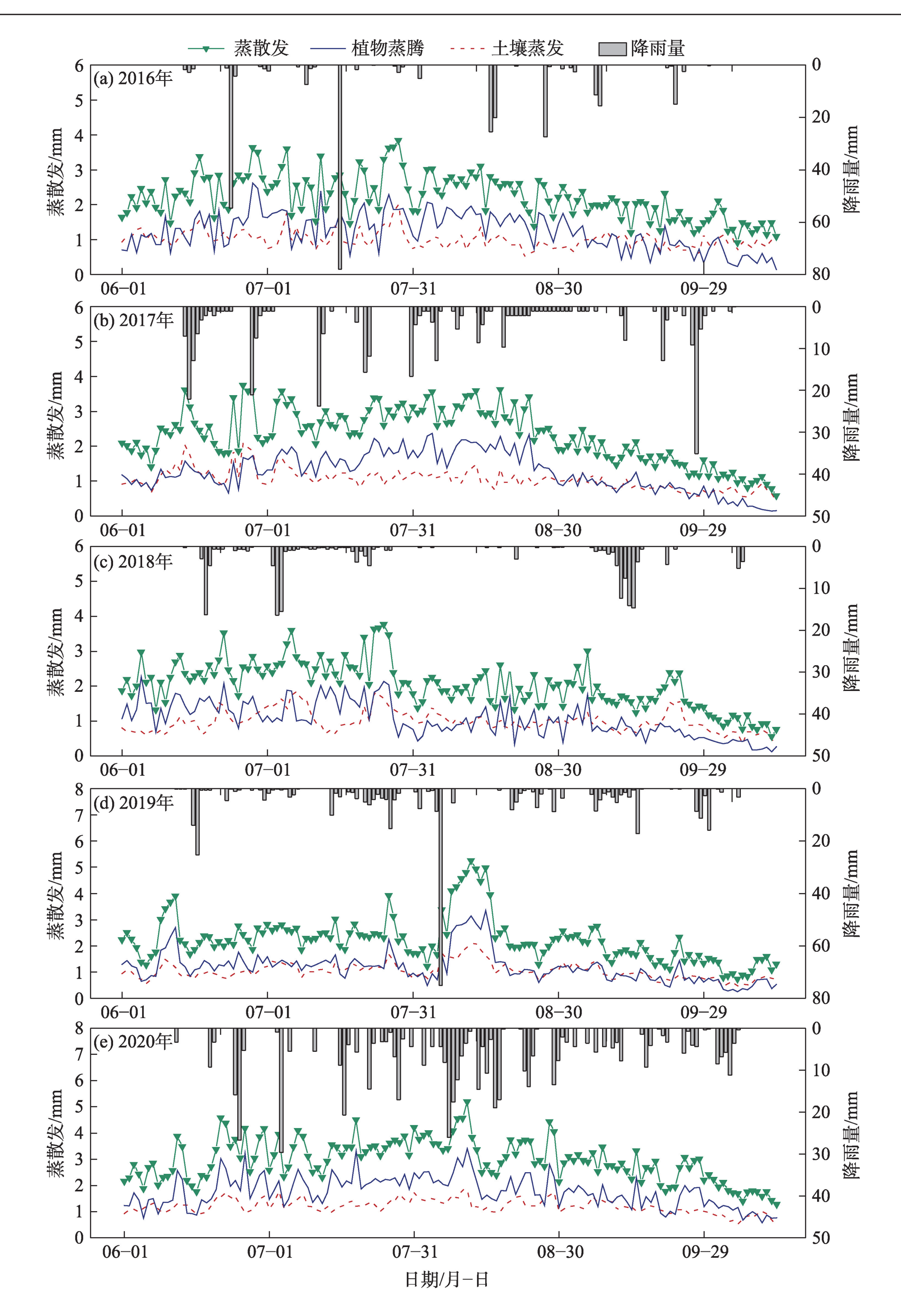


图3　典型人工林地蒸散发、植物蒸腾、土壤蒸发与降雨的日尺度动态变化

Fig. 3　Dynamic changes of evapotranspiration, plant transpiration and soil evaporation with rainfall in the typical plantation

276.76~402.86 mm，其中土壤蒸发量为134.26~167.08 mm，日均值为0.34~2.10 mm·d^{-1}；植物蒸腾量为142.26~239.12 mm，日均值为0.14~3.40 mm·d^{-1}；蒸散发、植物蒸腾、土壤蒸发最大值一般出现在7月，9月中旬以后有明显下降，并出现植物蒸腾接近甚至低于土壤蒸发现象。经统计，植物生长季日植物蒸腾与日蒸散发比例（*T*:*ET*）为41.5%~59.8%，日土壤蒸发与日蒸散发比例（*E*:*ET*）为40.2%~58.5%。

蒸散发、植物蒸腾、土壤蒸发与降雨的响应表现为年际变化趋势一致，但与次降水存在一定的滞后性。蒸散发、植物蒸腾、土壤蒸发量和降雨量均表现为丰水年（2020年）>平水年（2016年、2017年、

2019年)>枯水年(2018年)。受次强降水(2016年6月17日,7月13日,2017年6月10日、6月20日,2018年7月23日,2019年8月6日,2020年8月8日等)影响,蒸散发、植物蒸腾、土壤蒸发量在阶段峰值上与次降水出现了时间上的滞后。

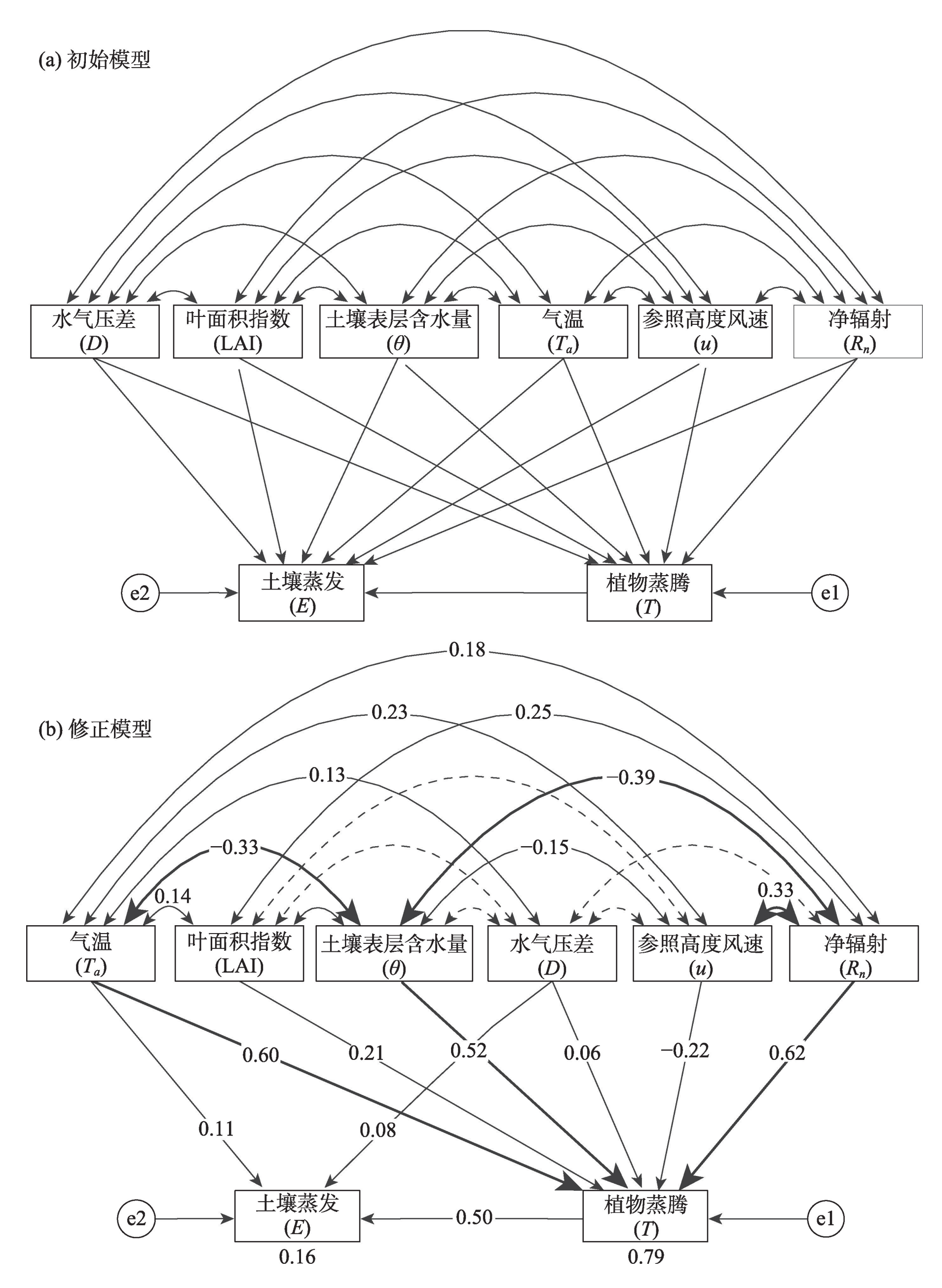
2.2 植物蒸腾、土壤蒸发控制因子

已有研究表明[8,24],影响植物蒸腾、土壤蒸发的主要因子包括叶面积指数、土壤表层含水量、空气饱和水汽压差等。本文结合S-W模型计算参数,进行植物蒸腾、土壤蒸发的控制因子分析,选取叶面积指数、土壤表层含水量、空气饱和水汽压差、气温、参照高度风速、净辐射6项指标为自变量,植物蒸腾、土壤蒸发2项指标为因变量,利用2016—2020年数据(共681组),基于结构方程模型(SEM)建立初始假设模型(图4a)。

2.2.1 模型适配度检验及调整与修正

(1) 初步检验及分析

模型初步运行后,发现土壤表层含水量、叶面



注:直线箭头表示箭头起始点变量对所指变量有直接影响,直线上数值表示标准化路径系数;曲线双向箭头表示变量间有相关关系,曲线上数值表示相关系数;方框下方数值表示被变量解释比例;线的粗细表示关系强弱,虚线表示相关关系不显著;e1、e2表示残差变异项。

图4 控制因子与植物蒸腾、土壤蒸发的结构方程路径图

Fig. 4 Structural equation path diagram of control factors with plant transpiration and soil water evaporation

积指数、参照高度风速、净辐射对土壤蒸发的P值分别为0.212、0.297、0.884、0.872，均未达0.05显著性水平检验，同时筛选控制因子间相互关系，将未达到显著性水平检验、路径系数较小的路径删除，得到修正模型(图4b)，初始及修正模型因子标准化系数及显著性见表2。

(2) 适配度检验

由修正后模型适配度指标可以看出(表3)，模型绝对适配指标和增值适配指标均达到标准，并且适配优异。

2.2.2 *植物蒸腾、土壤蒸发的控制因子*　为更好的对模型中各个控制因子的重要性进行比较，对图4的结果进行整理得到表4。修正后SEM模型显示出对植物蒸腾的总解释率为79.1%，对土壤蒸发的解释率为61.3%。由表4可知，植物蒸腾对土壤蒸发的影响为正相关，土壤蒸发随植物蒸腾的增大而增大，路径系数达0.503。所有控制因子中，净辐射对植物蒸腾影响最大，总影响为0.614，其余因子对植物蒸腾影响由大到小分别为气温、土壤表层含水量、叶面积指数、参照高度风速，所有控制因子对植物蒸腾均为直接影响。气温对土壤蒸发影响最大，总影响为0.426，除饱和水汽压差和气温外，其余因子对土壤蒸发体现为间接影响。

SEM模型也显示了6个控制因子间的相关关系

表2　控制因子间标准化系数及显著性

Tab. 2　Standardization coefficients and significance among control factors

初始模型参数估计							修正模型参数估计						
变量	关系	变量	*Std*	*S.E.*	*C.R.*	*P*	变量	关系	变量	*Std*	*S.E.*	*C.R.*	*P*
T	←	u	−0.218	0.042	−9.378	***	T	←	u	−0.219	0.042	−9.378	***
T	←	T_a	0.588	0.003	25.195	***	T	←	T_a	0.591	0.003	25.195	***
T	←	θ	0.513	1.286	20.429	***	T	←	θ	0.517	1.286	20.429	***
T	←	LAI	0.205	0.015	8.831	***	T	←	LAI	0.206	0.015	8.831	***
T	←	R_n	0.609	0.000	24.78	***	T	←	R_n	0.614	0.000	24.78	***
T	←	D	0.064	0.024	2.952	0.003	T	←	D	0.064	0.024	2.952	0.003
E	←	θ	−0.057	1.132	−1.249	0.212	E	←	T	0.514	0.018	13.77	***
E	←	T_a	0.098	0.003	2.104	0.035	E	←	D	0.083	0.017	2.669	0.008
E	←	LAI	−0.037	0.011	−1.044	0.297	E	←	T_a	0.110	0.003	2.784	0.005
E	←	T	0.535	0.027	9.758	***	T_a	↔	D	0.130	0.087	3.629	***
E	←	D	0.084	0.017	2.697	0.007	T_a	↔	R_n	0.181	7.113	4.687	***
E	←	u	0.005	0.031	0.146	0.884	u	↔	R_n	0.334	0.553	8.502	***
E	←	R_n	−0.008	0.000	−0.161	0.872	u	↔	θ	−0.146	0.000	−4.02	***
θ	↔	LAI	−0.346	0.000	−8.522	***	u	↔	T_a	0.231	0.058	5.96	***
θ	↔	D	−0.013	0.000	−0.336	0.737	θ	↔	LAI	−0.351	0.000	−8.711	***
θ	↔	T_a	−0.33	0.002	−8.181	***	θ	↔	T_a	−0.332	0.002	−8.279	***
θ	↔	u	−0.133	0.000	−3.431	***	θ	↔	R_n	−0.387	0.020	−9.448	***
θ	↔	R_n	−0.383	0.020	−9.317	***	LAI	↔	T_a	0.137	0.158	3.644	***
LAI	↔	D	0.081	0.020	2.114	0.035	LAI	↔	R_n	0.248	1.466	6.626	***
LAI	↔	T_a	0.138	0.163	3.573	***							
LAI	↔	R_n	0.235	1.539	5.976	***							
u	↔	LAI	−0.039	0.012	−1.022	0.307							
u	↔	D	−0.036	0.007	−0.946	0.344							
u	↔	T_a	0.221	0.059	5.627	***							
u	↔	R_n	0.326	0.566	8.076	***							
D	↔	T_a	0.13	0.093	3.369	***							
D	↔	R_n	0.028	0.859	0.739	0.460							
T_a	↔	R_n	0.182	7.144	4.658	***							

注：*Std*为标准化系数；*S.E.*为标准误差；*C.R.*为临界比；P为显著性水平；***为$P<0.001$，相关性显著；当$P>0.001$，显示具体数值；←为自变量指向因变量；↔为主因子之间相互关系；LAI为叶面积指数；θ为土壤表层含水量；u为参照高度风速；D为饱和水汽压差；T_a为气温；R_n为净辐射。

表3 SEM模型适配度检验

Tab. 3 SEM model fit test

检验统计量	参数	判别标准		分析结果
		原则	依据	
绝对拟合指标	卡方自由度比值(χ^2:df)	1<(χ^2:df)<3	越接近1越好	1.026
	绝对拟合指数(GFI)	0.9<GFI<1	越接近1越好	0.997
	近似误差均方根(RMSEA)	0<RMSEA	越低越好	0.006
相对拟合指标	比较适配指数(CFI)	0.9<CFI<1	越接近1越好	0.999
	规准适配指数(NFI)	0.9<NFI<1	越接近1越好	0.994

表4 控制因子对植物蒸腾和土壤蒸发影响系数

Tab. 4 Influence coefficients of control factors on plant transpiration and soil water evaporation

		饱和水汽压差	净辐射	气温	叶面积指数	土壤表层含水量	参照高度风速	植物蒸腾
总影响	植物蒸腾	0.064	0.614	0.591	0.206	0.517	−0.219	–
	土壤蒸发	0.116	0.309	0.426	0.104	0.260	−0.110	0.503
直接影响	植物蒸腾	0.064	0.614	0.591	0.206	0.517	−0.219	–
	土壤蒸发	0.083	–	0.128	–	–	–	0.503
间接影响	植物蒸腾	–	–	–	–	–	–	–
	土壤蒸发	0.032	0.309	0.298	0.104	0.260	−0.110	–

注:“–”表示几乎无影响。

(表2)。其中土壤表层含水量与其余5个控制因子相关性最高,且相关关系均为负相关,与净辐射相关性最大,相关系数达−0.387;其次是叶面积指数,相关系数为−0.351。正相关关系中参照高度风速与净辐射的相关系数最高,为0.334;其次是叶面积指数与净辐射,相关系数为0.248。以上控制因子间的相关性关系均符合常理。

3 讨 论

3.1 土壤表面抗阻力(r_s^s)的参数率定

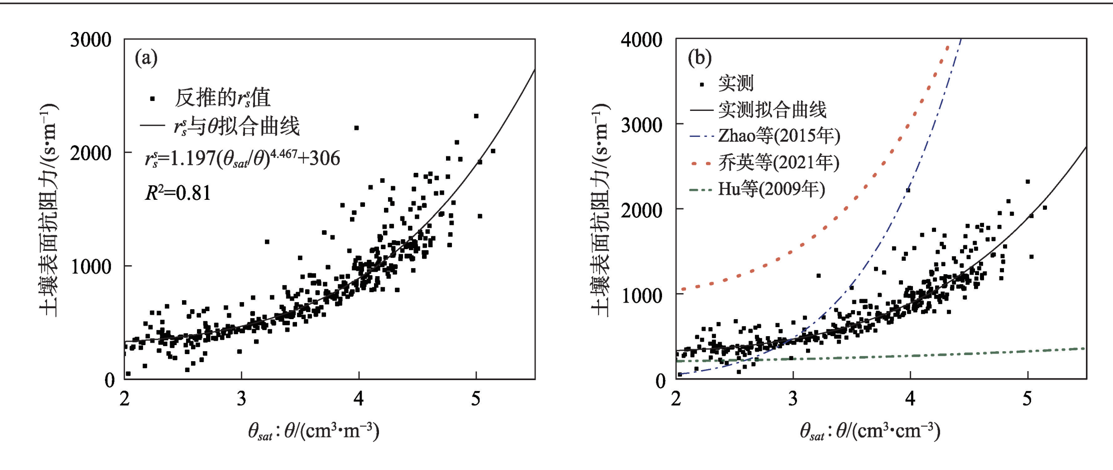
由于地区土壤类型及土壤质地的差异,r_s^s涉及因素众多,造成其参数难以通过统一方法确定,多以经验公式估算,以往的研究表明,r_s^s与θ的经验公式类型包括线性形式[25]、指数形式[23]、幂函数[26]等。本文通过拟合r_s^s与θ的函数关系,确定南小河沟流域r_s^s的函数类型为指数型(图5a),r_s^s随θ减小而增大。这是由于随着θ降低,土壤内部和外部的水汽压差减小,水汽传输速率减小,导致r_s^s增大[27]。Zhao等[23]、乔英等[24]、Hu等[28]的研究等同样得出r_s^s与θ的函数类型为指数型,通过对比分析(图5b),发现当研究区土壤质地中砂粒含量越大时,r_s^s与θ的函数关系指数形式表现越明显,而且沙粒含量越大,幂指数越大,这可为其他区域r_s^s经验公式估算提供参考。

3.2 蒸散发及组分比例

蒸散发是生态系统中水量收支和能量平衡的重要过程,与生态系统生产力密切相关,其中植物蒸腾作用越强,对生态环境的改善越有利,土壤蒸发越少,水分利用效率越高。因此,蒸散发组分可以反映不同生态系统水分循环的特点。研究发现[9,29–30],在植物生长季,植物蒸腾与蒸散发的比例一般约为60%~80%,而研究区植物蒸腾与蒸散发的比例偏低(平均占比51.6%),这可能是当地土壤水分、地形地貌、气候条件以及植被类型等共同作用所致。研究区地处干旱半干旱气候区,含有塬面、坡面、沟道等复杂地形地貌,植被类型为针叶类乔木人工林,相较于类型丰富且覆盖度较高的阔叶类林地或者草类植被的区域,土壤蒸发消耗更大,植物蒸腾占比相对较低,可见南小河沟流域对于提高植物吸收水分的效率仍然具有较大空间。

3.3 基于SEM模型的蒸散发及组分控制因子

传统的植物蒸腾和土壤蒸发控制因子研究仅分析控制因子对其影响,往往忽略植物蒸腾和土壤蒸发之间以及控制因子之间的相关影响。本文利用SEM模型探究了叶面积指数、土壤表层含水量等



注:θ_{sat}:θ为土壤饱和含水量与土壤表层含水量的比值。

图5　土壤表面抗阻力与土壤含水量关系

Fig. 5　Correlation between soil surface resistance and soil moisture content

6个控制因子对植物蒸腾和土壤蒸发的影响和路径贡献,并且分析了控制因子间的相关关系。研究表明,净辐射、气温、土壤表层含水率是蒸散发最重要的控制因子,其中净辐射对植物蒸腾的影响最大(总影响为0.614),这与刘国水等[31]的研究结果一致。太阳辐射是最大的能量来源,净辐射越强,可为植物蒸腾提供充足的驱动力,导致植物蒸腾量增加。

相关研究发现[32]影响土壤蒸发的因素基本上可分为气象因素(气温、饱和水汽压差、参照高度风速、净辐射等)和供水条件两大类,其中供水条件主要由土壤表层含水量决定。大部分学者[33]认为,当土壤水分缺乏时,土壤表层含水量是土壤蒸发的主要控制因子;但也有学者[34]认为气温才是土壤蒸发的主要控制因子。本研究结论与后者一致,气温对土壤蒸发总影响为0.426,而土壤表层含水量对土壤蒸发总影响为0.260。原因可能是只有在适宜的土壤表层含水量的基础上,气温才是土壤蒸发的主要控制因子,在植被干扰下,适宜的土壤表层含水量是气温对土壤蒸发产生影响的前提;SEM模型分析也表明,土壤表层含水量与另外5个控制因子(包括气温)相关性最高,且所有的控制因子对土壤蒸发主要体现为间接影响,另外研究区土壤表层含水量和日变化振幅较小。因此,虽然研究区土壤水分较小,上述原因在一定程度上削弱了土壤表层含水量对土壤蒸发的影响。讨论植被作用和气象作用对土壤蒸发的影响过程,本研究发现植物蒸腾对土壤蒸发的总影响达0.503,高于最大气象因子气温对土壤蒸发的影响,表明植被作用对土壤蒸发的影响大于气象作用对土壤蒸发的影响,与杨文静等[35]的研究一致。此外,选取的6个控制因子对土壤蒸发的解释率为61.3%,未被解释百分占比略大,因此认为可能相对于植物蒸腾,土壤蒸发的影响因素更多,过程更复杂,而SEM模型中选择分析的控制因子略少。

4　结　论

根据南小河沟流域2016—2020年野外试验数据,应用改进S-W模型对典型人工林地的ET、T和E进行量化和动态模拟,模拟发现改进S-W模型在南小河沟流域典型人工林地适用性较好,典型人工林地ET年均为320.24 mm,T、E分别占到ET的51.6%和48.4%,E占比较高,植物水分利用率低,可见研究区提高植物水分吸收还有较大空间。另外,基于SEM模型分析了多个气象因子对T、E的控制影响以及因子间的相互影响,其中Rn对T的影响最大,T_a对E的影响最大,植被作用对ET的影响程度大于气象因子对ET的影响,T对E的影响为正相关,E较于T,其产生过程及影响因素更复杂。因土壤类型和质地的差异,r_s^s其参数和形式难以通过统一方法确定,本研究区土壤表面抗阻力(r_s^s)经验公式为$r_s^s=1.197\left(\frac{\theta_{sat}}{\theta}\right)^{4.467}+306$,对比其他经验公式,发现土壤颗粒中沙粒含量越大,指数形式越明显,指数越大,可为其他区域r_s^s经验公式估算提供参考。

参考文献(References):

[1] 康利刚, 曹生奎, 曹广超, 等. 青海湖沙柳河流域蒸散发时空变化特征[J]. 干旱区研究, 2023, 40(3): 358−372. [Kang Ligang, Cao Shengkui, Cao Guangchao, et al. Temporal and spatial variation of evapotranspiration in Shaliuhe River Basin of Qinghai Lake[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(3): 358−372.]

[2] 李蓝君, 宋孝玉, 夏露, 等. 黄土高原沟壑区典型造林树种蒸散发对气候变化的响应[J]. 农业工程学报, 2018, 34(20): 148−159. [Li Lanjun, Song Xiaoyu, Xia Lu, et al. Response of evaporation of typical afforestation tree species to climate change in gully area of Loess Plateau[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2018, 34(20): 148−159.]

[3] 庄淏然, 冯克鹏, 许德浩. 蒸散分离的玉米水分利用效率变化及影响因素[J]. 干旱区研究, 2023, 40(7): 1117−1130. [Zhuang Haoran, Feng Kepeng, Xu Dehao. Changes and influencing factors of water use efficiency of maize by evapotranspiration[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(7): 1117−1130.]

[4] Kell B W, Paul J H, Patrick J M, et al. A comparison of methods for determining forest evapotranspiration and its components: Sapflow, soil water budget, eddy covariance and catchment water balance[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2001, 106: 153−168.

[5] Gharsallah O, Facchi A, Gandolfi C. Comparison of six evapotranspiration models for a surface irrigated maize agroecosystem in northern Italy[J]. Agricultural Water Management, 2013, 130: 119−130.

[6] 卢宝宝, 孙慧兰, 姜泉泉, 等. 近53 a新疆水分盈亏量时空变化特征[J]. 干旱区研究, 2021, 38(6): 1579−1589. [Lu Baobao, Sun Huilan, Jiang Quanquan, et al. Spatiotemporal variation characteristics of the water budget in Xinjiang during the latest 53 years[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(6): 1579−1589.]

[7] 段利民, 童新, 吕扬, 等. 固沙植被黄柳、小叶锦鸡儿蒸腾耗水尺度提升研究[J]. 自然资源学报, 2018, 33(1): 52−62. [Duan Limin, Tong Xin, Lv Yang, et al. Study on the enhancement of water consumption scale of sand-fixing vegetation *Salix koreensis* and *Cotoneaster horizontalis*[J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33(1): 52−62.]

[8] 王宇, 周莉, 贾庆宇, 等. 基于Shuttleworth-Wallace模型的水稻蒸散组分模拟及其特征分析[J]. 中国农业气象, 2017, 38(11): 709−719. [Wang Yu, Zhou Li, Jia Qingyu, et al. Simulation and characteristic analysis of rice evapotranspiration components based on Shuttleworth-Wallace model[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2017, 38(11): 709−719.]

[9] 包永志, 刘廷玺, 段利民, 等. 基于Shuttleworth-Wallace模型的科尔沁沙地流动半流动沙丘蒸散发模拟[J]. 应用生态学报, 2019, 30(3): 867−876. [Bao Yongzhi, Liu Tingxi, Duan Limin, et al. Evaporation simulation of mobile semi-mobile dunes in Horqin Sandland based on Shuttleworth-Wallace model[J]. Journal of Applied Ecology, 2019, 30(3): 867−876.]

[10] Shuttleworth W J, Wallace J S. Evaporation from sparse crops-an energy combination theory[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1985, 111: 839−855.

[11] Ortega F S, Poblete E C, Brisson N. Parameterization of a two-layer model for estimating vineyard evapotranspiration using meteorological measurements[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2010, 150: 276−286.

[12] 李艳, 刘海军, 黄冠华. 麦秸覆盖条件下土壤蒸发阻力及蒸发模拟[J]. 农业工程学报, 2015, 31(1): 98−106. [Li Yan, Liu Haijun, Huang Guanhua. Soil evaporation resistance and evaporation simulation under wheat straw mulch[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(1): 98−106.]

[13] 刘春伟, 曾勰婷, 邱让建. 用分时段修正双源模型估算南京地区冬小麦生育期蒸散量[J]. 农业工程学报, 2016, 32(增刊): 80−87. [Liu Chunwei, Zeng Xieting, Qiu Rangjian. Estimation of evapotranspiration of winter wheat during growth period in Nanjing using time-segmentated modified dual-source model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(Suppl.): 80−87.]

[14] 胡广录, 刘鹏, 李嘉楠, 等. 黑河中游绿洲边缘三种景观类型土壤水分动态特征及影响因素[J]. 干旱区研究, 2024, 41(4): 550−565. [Hu Guanglu, Liu Peng, Li Jianan, et al. Characteristics of soil moisture dynamics and influencing factors of three landscape types at the oasis edge in the middle reaches of the Heihe River[J]. Arid Zone Research, 2024, 41(4): 550−565.]

[15] 赵丽雯, 赵文智, 吉喜斌. 西北黑河中游荒漠绿洲农田作物蒸腾与土壤蒸发区分及作物耗水规律[J]. 生态学报, 2015, 35(4): 1114−1123. [Zhao Liwen, Zhao Wenzhi, Ji Xibin. Differentiation of crop transpiration and soil evaporation in the farmland oasis of the middle reaches of Heihe River in northwest China and the law of crop water consumption[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(4): 1114−1123.]

[16] 姚佳, 陈启慧, 李琼芳, 等. 伊犁河—巴尔喀什湖流域实际蒸散发时空变化特征及其环境影响因子[J]. 干旱区研究, 2022, 39(5): 1564−1575. [Yao Jia, Chen Qihui, Li Qiongfang, et al. Spatial and temporal variation of actual evapotranspiration and its environmental impact factors in the Ili River-Balkhash Lake Basin[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(5): 1564−1575.]

[17] 魏宁宁, 母艳梅, 姜晓燕, 等. 毛乌素沙地油蒿−杨柴灌丛生态系统蒸散组分分配及其影响因子[J]. 应用生态学报, 2021, 32(7): 2407−2414. [Wei Ningning, Mu Yanmei, Jiang Xiaoyan, et al. Distribution of evapotranspiration components and its influencing factors in *Artemisia ordosica* shrub ecosystem in Mu Us Sandy Land[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(7): 2407−2414.]

[18] 雷菲亚, 李小双, 陶冶, 等. 西北干旱区藓类结皮覆盖下土壤多功能性特征及影响因子[J]. 干旱区研究, 2024, 41(5): 812−820. [Lei Feiya, Li Xiaoshuang, Tao Ye, et al. Characterization of soil multifunctionality and its determining factors under moss crust

cover in the arid regions of Northwest China[J]. Arid Zone Research, 2024, 41(5): 812-820.]

[19] Noilhan J, Planton S. A simple parameterization of land surface processes for meteorological models[J]. Monthly Weather Review, 1989, 117: 536-549.

[20] 周静, 孙永峰, 丁杰萍, 等. 退化沙质草地恢复过程中植被生物量变化及其与土壤碳的关系[J]. 干旱区研究, 2023, 40(9): 1457-1464. [Zhou Jing, Sun Yongfeng, Ding Jieping, et al. Changes in vegetation biomass and its relationship with soil carbon during restoration processes in degraded sandy grasslands[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(9): 1457-1464.]

[21] Jarvis P G. The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B Biological Sciences, 1976, 273: 593-610.

[22] 崔建国. 黄土半干旱区林木水分生理特性与土壤水分关系研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2012. [Cui Jianguo. Relationship Between forest Water Physiological Characteristics and Soil Water In Loess Semi-arid Region[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2012.]

[23] Zhao P, Li S, Tong S L, et al. Comparison of dual crop coefficient method and Shuttleworth-Wallace model in evapotranspiration partitioning in a vineyard of Northwest China[J]. Agricultural Water Management, 2015, 160: 41-56

[24] 乔英, 马英杰, 辛明亮. 基于改进S-W与结构方程模型的干旱区枣园蒸散特征分析[J]. 农业机械学报, 2021, 52(8): 307-317. [Qiao Ying, Ma Yingjie, Xin Mingliang. Evapotranspiration characteristics of Jujube orchard in arid region based on improved S-W and Structural Equation model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(8): 307-317.]

[25] Zhang B Z, Kang S Z, Li F S, et al. Comparison of three evapotranspiration models to Bowen ratio-energy balance method for a vineyard in an arid desert region of northwest[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2008, 148: 1629-1640

[26] Chen H, Huang J J, Mcbean E. Partitioning of daily evapotranspiration using a modified Shuttleworth-Wallace model, random Forest and support vector regression, for a cabbage farmland [J]. Agricultural Water Management, 2020, 228: 105923.

[27] 张瑞文, 赵成义, 王丹丹, 等. 极端干旱区不同水分条件下胡杨林生态耗水特征[J]. 水土保持学报, 2019, 33(4): 270-278. [Zhang Ruiwen, Zhao Chengyi, Wang Dandan, et al. Ecological water consumption characteristics of poplar forest under different water conditions in extreme arid region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(4): 270-278.]

[28] Hu Z M, Yu G R, Zhou Y L, et al. Partitioning of evapotranspiration and its controls in four grassland ecosystems: Application of a two-source model[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2009, 149: 1410-1420.

[29] Kang S, Gu B, Du T. Crop coefficient and ratio of transpiration to evapotranspiration of winter wheat and maize in semi-humid region [J]. Agricultural Water Management, 2007, 59: 239-254.

[30] Zhu G F, Su Y H, Li X, et al. Estimating actual evapotranspiration from an alpine grassland on Qinghai-Tibetan plateau using a two-source model and parameter uncertainty analysis by Bayesian approach[J]. Journal of Hydrology, 2013, 476: 42-51.

[31] 刘国水, 刘钰, 蔡甲冰, 等. 农田不同尺度蒸散量的尺度效应与气象因子的关系[J]. 水利学报, 2011, 42(3): 284-289. [Liu Guoshui, Liu Yu, Cai Jiabing, et al. Relationship between scale effects of evapotranspiration at different scales and meteorological factors in farmland[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(3): 284-289.]

[32] 吴友杰, 杜太生. 西北干旱区农田土壤蒸发量及影响因子分析[J]. 农业工程学报, 2020, 36(12): 110-116. [Wu Youjie, Du Taisheng. Analysis of soil evaporation and its influencing factors in arid area of Northwest China[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2020, 36(12): 110-116.]

[33] 刘丽霞, 王辉, 孙栋元, 等. 绿洲农田防护林系统土壤蒸发特征研究[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 11(1): 162-166. [Liu Lixia, Wang Hui, Sun Dongyuan, et al. Study on soil evaporation characteristics of oasis farmland shelterbelt system[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2008, 11(1): 162-166.]

[34] Goyal R K. Sensitivity of evapotranspiration to global warming: A case study of arid zone of Rajasthan[J]. Agricultural Water Management, 2004, 69: 1-11.

[35] 杨文静, 赵建世, 赵勇, 等. 基于结构方程模型的蒸散发归因分析[J]. 清华大学学报, 2022, 62(3): 581-588. [Yang Wenjing, Zhao Jianshi, Zhao Yong, et al. Evapotranspiration attribution analysis based on structural equation model[J]. Journal of Tsinghua University, 2022, 62(3): 581-588.]

Research on the distribution and control mechanism of evapotranspiration in the Nanxiaohegou watershed based on an improved S-W model

YANG Nan[1], SONG Xiaoyu[2], DENG Jianwei[1], LI Lanjun[2], ZHAO Xinkai[2], MENG Pengfei[2], FU Chong[2], WEI Wanyin[2], ZHANG Yubin[1], DING Lin[1], LI Haolin[3]

(1. Gansu Academy for Water Conservancy, Lanzhou 73000, Gansu, China; 2. State Key Laboratory of Eco-Hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi, China; 3. Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: In this study, we aimed to accurately quantify evapotranspiration (*ET*) and its components while exploring the factors that control it, which will facilitate the practical evaluation, planning, and management of regional water resources. Utilizing continuous long-term observation data and field tests conducted from 2016 to 2020 in the Nanxiaohegou watershed—a typical small watershed for water and soil conservation on the Loess Plateau—this study simulated the dynamic changes of *ET* and its components in typical plantation land using the improved Shuttleworth-Wallace (S-W) model. Additionally, we analyzed the coupling relationships between plant transpiration (*T*), soil evaporation (*E*), and control factors using a structural equation model. The results revealed the following: (1) The modified S-W model was effective for evaluating *ET* and its components in Nanxiaohe Valley. The threshold value of soil surface resistance (r_s^s) was 50−2500 s·m^{-1}, exhibiting an exponential relationship with the empirical function of soil surface water content (θ); moreover, higher sand content in the soil particles correlated with a steeper linear slope. (2) *ET* ranged from 276.76 mm to 402.86 mm in typical plantation land, with annual averages of *T* and *E* accounting for 51.6% and 48.4% of *ET*, respectively. While monthly *ET*, *T*, and *E* patterns were not pronounced, daily fluctuations were significant. The fluctuation trends of *T* and *E* largely reflected annual precipitation patterns but lagged behind rainfall. (3) Structural equation modeling analysis revealed that net radiation (R_n), temperature (T_a), and θ exerted the most significant effects on *ET*, with R_n having the largest impact on *T* (total impact of 0.614) and T_a having the most significant impact on *E* (total impact of 0.426). *T* was positively correlated with *E*, with a contribution coefficient of 0.503. Evaluating *ET* and its components using an improved S-W model establishes a foundation for a deeper understanding of ecological and hydrological processes in arid and semiarid regions.

Keywords: evaporative components; improve the S-W model; SEM model; evaporation resistance; Nanxiaohegou watershed